

インテリジェントCADのための 設計過程の論理による形式化

東京大学工学部 ○武田英明(精学)・富山哲男(精正・機正)・吉川弘之(精正、機正)

1 設計研究とCAD研究

現在、より高度に設計者を支援するCADシステムが必要とされている。しかしCADを高度化するという視点から現在のCADシステムを評価すると、
・設計過程や設計モデルを支援は部分的である
・設計者の誤りを指摘できない
・データの取り扱いが未解決である
・一時的表現、曖昧表現、矛盾を含む表現ができない等の問題がある[1]。すなわち統合化や知能化が図られていないということである。これらの問題は根本的には設計自体の研究が未発達であるに起因している。

本研究ではこのために設計の形式化・定式化を試みる。設計問題の形式化・定式化は設計問題の解明・明示化であると同時に設計の計算機化に対する指針になる。

2 設計の形式化の方法論

前章で述べたように設計の形式化は設計とCADの中間にあるものである(図1)。このとき特に以下の2つの問題の方法を明らかにする必要がある。

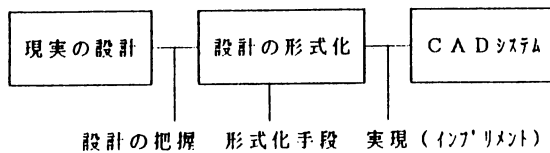


図1 設計の定式化の意味

(1) 設計の把握

形式化を行うにはその形式化対象に関する情報が必要である。すなわち設計問題を理解する、あるいは設計に関する情報を得る必要がある。

この方法には大きく分けて3つある。1番目はなんらかの設計の理論(形式化)に基づくCADを実際に利用してもらい、そこからのフィードバックを用いる方法である。2番目は実際の設計製品や設計現場での手順書や資料を用いる方法である。3番目は模擬的な設計を行なわせそこからデータを集める方法(設計実験)である[2]。どれも利点・欠点があるが、今回は設計実験を用いることにした。理由は条件等の設定により必要な情報が得られると考えたからである。

(2) 形式化手段

どのような方法を用いて形式化を行うかということである。形式化をするにはなんらかの理論(formal theory)が必要である。設計自体に内在する理論を見だして利用するか、あるいはなんらかの理論を他から持ってきて利用するか、どちらかが必要である。後者の方法としては例えば数学的方法、言語学的方法、心理学的方法等が考えられる。

本稿では(述語)論理をこの形式化手段として用いる。論理は本来人間の思考についての研究であるので、思考としての側面を持つ設計を表現するのは論理にとって自然である。また論理はよく形式化され、数学的体系として優れているため、計算機化に向いている。すなわち設計の形式化に向いている手段であると考えられる。

3 設計実験

3-1 実験の方法と結果

設計実験の手法としてプロトコル解析を用いた[3]。プロトコル解析は被験者の発話や動作、図面を通じての意志伝達を記録できるので、データ収集能力に優れている[4]。被験者は学生と企業において設計経験がある者で、被験者を替えて同じ課題について2人一組で3回(計6人)行った。設計課題としたのは自動販売機の搬出部の概念設計である。設計中の会話と動作はVTRを用いて記録し、また設計中に書かれた図面等は一定の間隔でコピーを取り、記録に残した。

実験の結果はプロトコル・データである。実験中の会話を使われた図(ボンチ絵等)と結び付けて、プロトコルを構成した。図2はその例である。

- ・図aのような機構も考えられる。
- ・少し無理がある。
- ・リンク機構という手もある。
- ・カム機構でもできる。
- ・全部カムで押し出すなら、かなりの長さをとる。
- ・押し出した後はどうするか。
- ・図bのようにガイド・ラインをつけると出てる。
- ・とにかく1個出れば良い。
- ・重量は問題にならないのか。
- ・図cのような支えをつければ、問題ない。
- ・同期の図はなぜ取崩部が2列なのか。
- ・2列なら量が増やせる。
- ・自動販売機自体をどのくらい大きに
するかに左右される。
- ・補給回数を減らすなら、2列だ。

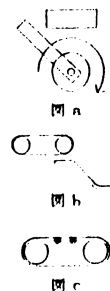


図2 プロトコル・データの例

3-2 結果の考察

前節の結果を観察すると、一つの設計において多くの解候補が現れていることが分かる。この解候補の変化と設計者の視点の変化を図示したのが図3である。この図より、設計者は複数の解候補を同時に用いて、個々の解を具体化しながら検討することで、設計を進めていることが分かる。

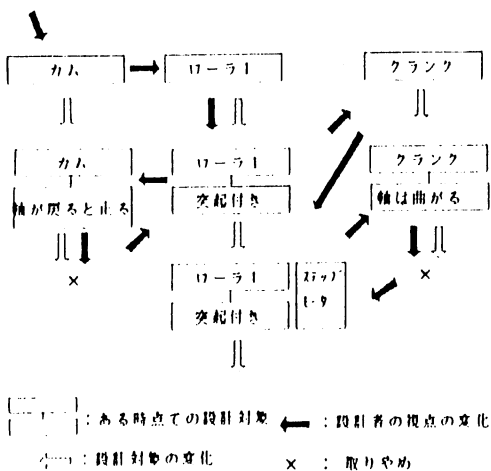


図3 設計対象の変化と設計者の視点の変化

またここで一つの決定がなされるまでのプロトコルを観察して、この中から以下の5つの過程を抽出した。設計過程をこれらの段階の繰り返しとみる。これは問題解決の過程として一般的にいわれるものと整合する(例えば[5])。

- 1) 問題提起: 解決すべき問題の見え・指摘
- 2) 提案: 問題提起に対し、解決候補を出す段階
- 3) 展開: 提案した解候補を設計者が有している知識をもとに具体化
- 4) 評価: 展開した各解候補をある評価基準で評価
- 5) 決定: 評価を基にどれを採用するか決定

このサイクルが繰り返され、設計対象の各部が決定されていく(図4)。

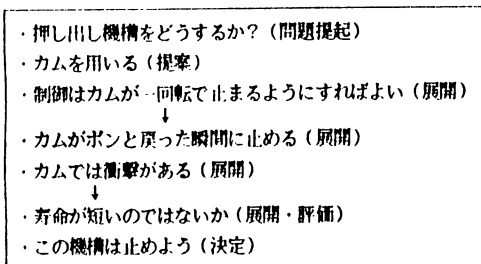


図4 設計過程の5段階の例

4 設計過程の論理による表現

前章で分類した過程を論理で分析・表現して、どのように論理を用いることができるかをみる。ここでは単に1階の述語論理だけでなく、非標準的な論理も含む広い意味での論理を考える。

3章で見たように多くの解の候補が同時に扱われている。この状況を自然に表現するために機相論理を用いて表現する(例えば[6])。機相記号としては口は必然機相、◇は可能機相を示す。

また多くの試行錯誤が現れている。すなわち一度決定したことがしばしば覆されている。このような問題を扱うには単調の論理では不可能で、非単調の論理(例えば[7],[8])が必要である。ここでは撤回可能な言明を Δp とする(Reiterにおけるデフォルト表現の「 $\vdash Mp/p$ 」に対応する)。

以上の論理体系で設計過程を捉えたとき、3章で分類した過程のうち論理的推論(演繹)で表現できるものは主に提案の結果と展開と評価の一部である。問題提起と決定は複雑な問題解決であり演繹では捉えられない。提案自身はやはり発想等を含む過程であり演繹では捉えられないが、提案されたものは展開と評価において演繹の対象となる。

これだけの論理的枠組みでプロトコル・データがどれだけ表現できるかを試してみたのが図5である。

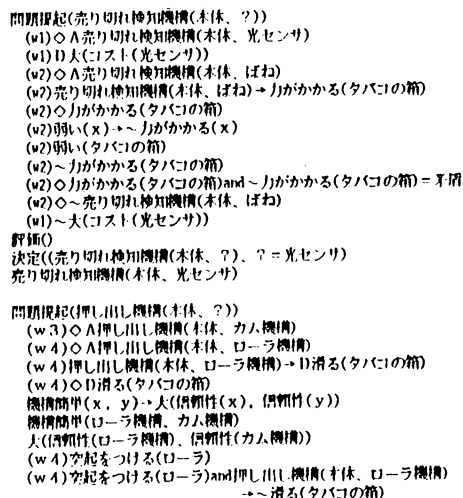


図5 プロトコル・データの論理的表現の例

この結果から設計過程と論理の関係について以下のことがいえる。

○演繹は設計過程を部分的には説明することができるが、全体としては演繹とそれ以外が混ざり合いながら設計は進んでいると見る事ができる。また単純な演繹だけではない。

○様相記号の導入によって設計の進行と設計者の視点の変化を自然に表現できる。また知識の"有効範囲(scope)"の違いを表現できる。

○設計においては非単調推論と似た形の矛盾の回避や後戻りが行われていることが分かる。

5 解決すべき問題

5-1 演繹における問題

論理式集合Sに対して、演繹可能な論理式の全体を

$$Th(S) = \{p : S \vdash p, p \text{ は論理式}\}$$

とすると、 $Th(S)$ はSに比べて極めて大きくなる。このため $Th(S)$ を求めることは実際的ではない(多くの場合不可能である)。実際問題としては

$$Th'(S) \subset Th(S)$$

なる $Th'(S)$ を求めることになる。これは当然論理における完全性は満たしていない。しかし制限の方法($Th'(S)$ の作り方)が明示的であれば実際の問題として有用である。

設計中では明示的あるいは暗黙にこのような制限を使っている。例えば注目する問題についての議論のみを進めることは、注目する述語や項に関する論理式のみを導出を行っていると見ることができる。また欲しい事実の正当化は後向き推論、見方の転換は用いる論理式集合の切り替え、解くべき手順の指定は論理式集合の順次指定であると思えることができる。

このようなヒューリスティックな制限方法を利用すると、演繹を基本として設計手順や経験的設計法を記述することが可能である。

5-2 演繹自体の問題

演繹自体は公理系を変更しない。公理系を与えられた知識の世界だとすると、与えられた世界を変更しないことになる。このように考えるとき、設計に含まれる、世界になかったものを作り出す行為(創造的行為)は演繹では捉えることはできなくなる。

例えば、演繹において、

$$(1) p(a), \forall (p(x) \supset q(x)) \vdash q(a)$$

は導ける。しかし、

$$(2) q(a), \forall (p(x) \supset q(x)) \text{ ?} \vdash p(a)$$

はできない。これは $p(a)$ 、 $q(a)$ がある新しい公理系を作る行為である。(2)のような行為を可能にする方法としてabduction(仮説形成)やモデルの極小拡大[9]などが考えられる。

実際の設計は(1)と(2)が交互に行われている。

例えば展開・評価は(1)、提案は(2)というように交互に現れている。

(2)を可能にする方法と(1)との組合せを実現することが必要である。

6 インテリジェントCADにおける論理の利用

1章で述べたように、設計過程の形式化はCAD構築の指針となる。

これまで議論してきた論理的枠組みを用いたCADを構築すると、演繹を基本として5-1、5-2で述べたような多様な操作を行うことができる。すなわち設計過程に全般にわたる支援や手順や経験的方法といった設計過程に関する知識も含めた設計知識の統一的表现が可能になる。これによってインテリジェントCADとして必要とされること(例えば[10])の多くを実現することができる。

すなわちこのような知識を論理で表現して処理するシステム(論理式ベースシステム、logical formula based system)は、インテリジェントCAD構築において有効かつ強力な方法である。

7 結論と展望

本研究では設計過程を明示化するために設計実験という手法を用いて設計を観察すると共に、論理的枠組みを用いて設計を形式化する方法について考察を行った。そして論理によって把握可能な部分と不可能な部分について議論することによって、設計過程の全体を明らかにした。

今後は、①設計実験の方法論の研究と実験の継続、②設計過程を記述するのに必要十分な論理についてさらに考察を加えること、③本稿で用いた論理を基に推論可能な方式の確立とシステムの実現、という3点を中心に研究をしていく予定である。

参考文献

- [1] V. Akman, P. ten Hagen & T. Tomiyama: "Design as a Formal Knowledge Engineered Activity", Report CS-R8744, CWI (1987) Amsterdam
- [2] 吉川他: 実験設計学, 精密機械47.7(1981)46-51
- [3] K.A. Ericsson H.A. Simon "Verbal reports as data" Psychological Review Vol.87 (3) 215-251
- [4] D.G. Ullman et al: "Preliminary Results of an Experimental study of the Mechanical Design Process", Results from the NSF Workshop on the Design Process, (1987)145-186.
- [5] 三宅なほみ: 理解におけるインタラクションとは何か in 佐伯編: 理解とは何か 東大出版会(1985)
- [6] G.E. Hughes: An Introduction to Modal Logic(1968)
- [7] D. McDermott, J. Doyle: "Non-Monotonic Logic I", Artificial Intelligence 13(1980) 41-72
- [8] R. Reiter: "A Logic for Default Reasoning" Artificial Intelligence 13(1980) 81-132
- [9] T. Yagiu: "A Third Meaning of Logical Formula", IFIP WG.5.2 Workshop on Intelligent CAD(1987)
- [10] T. Tomiyama & H. Yoshikawa: "Requirements and principles for Intelligent CAD systems", in J.S. Gero(ed.): "Knowledge Engineering in Computer Aided Design", North-Holland, Amsterdam (1985)pp.1-28